

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до організації самостійної роботи
та проведення практичних занять
із навчальної дисципліни

**СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2019**

Методичні рекомендації до організації самостійної роботи та проведення практичних занять із навчальної дисципліни «Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка») Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 46 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. М. І. Шпіка.

канд. техн. наук, доц. С. О. Закурдай.

ст. викладач В. А. Герасименко

Рецензент

Ю. П. Колонтаєвський, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 1
від 28 серпня 2018 р.*

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Випрямлячі	6
1.1 Загальна характеристика випрямлячів.....	6
1.2 Робота випрямлячів на активне навантаження.....	8
1.3 Робота випрямлячів на активно-ємнісне навантаження.....	11
1.4 Робота випрямлячів на активно-індуктивне навантаження.....	13
1.5 Розрахунок параметрів силового випрямляча.....	14
1.6 Розрахунок параметрів фільтру	16
2 Тиристорні перетворювачі в електроприводах постійного струму.....	20
3 Використання широтно-імпульсної модуляції в силових перетворювачах.....	22
4 Безпосередні перетворювачі частоти та їх застосування.....	29
5 Інвертори струму та напруги в електроприводах змінного струму.....	32
5.1 Автономні інвертори струму.....	34
5.2 Автономні інвертори напруги.....	38
5.3 Розрахунок параметрів схеми автономного інвертора напруги.....	43
Список використаних джерел.....	46

ВСТУП

Останні десятиліття ознаменувалися значними успіхами силової електроніки. Було освоєно промислове виробництво запираючих GTO - тиристорів, біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT) та силових модулів на їхній основі (стійки й цілі інвертори), а також силових інтелектуальних модулів (IPM) із вбудованими засобами захисту ключів та інтерфейсами для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування. Знизились ціни як на комплектуючі, так і на перетворювачі частоти в цілому, підвищилась їх надійність, зменшились масо-габаритні показники. Це дозволило досить широко впроваджувати керовані асинхронні електроприводи замість електроприводів постійного струму.

У наш час частотно-регульовані асинхронні електроприводи потужністю від одиниць до сотень кіловат застосовуються в різних галузях виробництва, житлового комунального господарства та на електричному транспорті. Сучасний етап розвитку даного виду техніки характеризується підвищенням техніко-економічних показників перетворювачів частоти за рахунок використання нових напівпровідникових приладів.

Ріст ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці й перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів із вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв надали незворотної тенденції масовій заміні аналогових систем керування приводами на системи прямого цифрового керування.

Транзисторні і тиристорні перетворювачі частоти для асинхронного електроприводу провідних закордонних електротехнічних фірм, як правило, базуються на трифазних автономних інверторах напруги з різного роду широтно-імпульсним керуванням. До складу таких перетворювачів частоти входять також випрямлячі з фільтром.

Розробки провідних закордонних електротехнічних фірм проводяться за наступними напрямками:

- розробка GTO-тиристорів і швидковідновлюючих діодів;
- розробка IGBT-транзисторів у виді модулів;
- розробка спеціальних малоіндуктивних конденсаторів для захисту інверторів;
- розробка спеціальних фільтрових конденсаторів великої одиничної місткості для вхідних ланцюгів інверторів;
- розробка нових рішень схемотехніки в частині силової схеми і системи керування перетворювача;
- розробка оптимальних алгоритмів керування і регулювання перетворювача і електроприводу;
- розробка мікропроцесорних систем керування і їх програмного забезпечення.

Створювані на базі перелічених вище елементів і технічних рішень перетворювачі частоти й електроприводи відрізняються від перетворювачів частоти й електроприводів, що раніше випускалися, більш високими ККД, коефіцієнтом потужності, кращими масо-габаритними показниками, регульовальними характеристиками, підвищеною надійністю.

В методичних вказівках до проведення практичних занять та виконання самостійної роботи з дисципліни «Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу» будуть розглянуті питання роботи випрямлячів та безпосередніх перетворювачів частоти, використання широтно-імпульсної модуляції в силових перетворювачах, особливості роботи автономних інверторів струму і напруги та інше.

1 ВИПРЯМЛЯЧІ

1.1 Загальна характеристика випрямлячів

Випрямлячі знайшли широке використання в керованих електроприводах постійного струму та в складі перетворювачів частоти електроприводів змінного струму.

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення змінної напруги в постійну. Випрямляч складається з керованих або некерованих вентилів, включених по визначеній схемі для забезпечення протікання струму в ланці навантаження та перетворення змінної напруги в пульсуючу.

На вході випрямляча, в більшості випадків, стоїть трансформатор, щоб одержати необхідну величину вхідної напруги. Випрямляч може також підключатися вхідною ланкою до генератора змінного струму.

Для зменшення пульсацій випрямленої напруги на виході випрямляча ставлять електричний фільтр. Електричний фільтр для силових перетворювачів виконується на пасивних RLC-елементах.

Щоб суттєво не погіршився режим роботи випрямляча, в стаціонарних та перехідних режимах необхідно правильно вибрати схему та параметри фільтру. Для потужних випрямлячів не рекомендується використовувати фільтри з ємнісною вхідною ланкою, так як вони погіршують форму струмів в вентилях та обмотках трансформатора. В той же час для випрямлячів малої потужності, які мають значний внутрішній опір, ємнісні фільтри широко використовуються.

В залежності від числа фаз напруги живлення випрямлячі поділяються на однофазні та трьохфазні. Крім того, випрямлячі поділяються на однокатні та двокатні.

Якщо струм у вторинній обмотці трансформатора не змінює свій напрямок за період, то такий випрямляч називається однокатним.

У двокатних випрямлячах струм у вторинній обмотці трансформатора змінює свій напрямок за період два рази.

В залежності від навантаження, схеми фільтру та особливостей його роботи, розрізняють такі основні режими роботи випрямлячів:

- на активне навантаження;
- на активно-ємнісне навантаження;
- на активно-індуктивне навантаження;
- на проти-ЕРС.

Основні електричні параметри випрямлячів:

$I_{н.ср}$ – середнє значення випрямленого струму;

$U_{н.ср}$ – середнє значення випрямленої напруги;

$U_{оон.т}$ – амплітуда основної гармоніки випрямленої напруги;

$P_{н.ср}$ – потужність навантаження;

p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги;

I_1, U_1 – діючі значення струму та напруги на первинній обмотці трансформатора;

I_2, U_2 – діючі значення струму та напруги на вторинній обмотці трансформатора;

$S_{тр}$ – типова потужність трансформатора;

η – коефіцієнт корисної дії.

Контрольні запитання

1. Що представляє собою випрямляч?
2. Де знайшли використання випрямлячі?
3. З чого складається випрямляч?
4. Що стоїть в більшості випадків на вході випрямляча?
5. Який випрямляч називається однотактним?
6. Який випрямляч називається двотактним?
7. Які основні режими роботи випрямлячів?
8. Чи використовуються фільтри з ємнісною вхідною ланкою для потужних випрямлячів?

9. Чи використовуються ємнісні фільтри для випрямлячів малої потужності?
10. Від чого залежить режим роботи випрямляча?
11. Які основні електричні параметри випрямлячів?

1.2 Робота випрямлячів на активне навантаження

На рисунку 1.1 приведено схеми однофазних однотактного та двотактного випрямлячів. Однотактний випрямляч виконано за схемою з середньою точкою (див. рис. 1.1, а), а двотактний – за схемою мостового (див. рис. 1.1, б). В обох випадках випрямлячі включені на активне навантаження.

Слід відмітити, що однофазна схема з середньою точкою з боку вторинної обмотки трансформатора є двофазною, тому що половина обмотки і включений послідовно з нею вентиль проводять струм за інтервал π , а інший вентиль в цей час закритий.

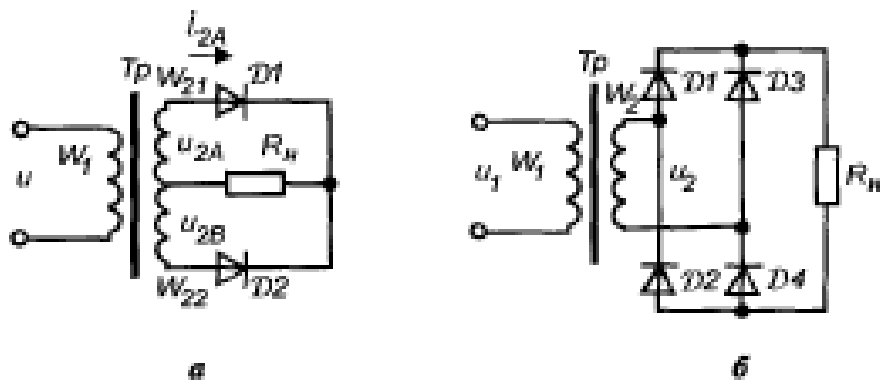


Рисунок 1.1 – Схеми однофазних випрямлячів:

а – з середньою точкою; б – мостового

Часові діаграми процесів в однофазних випрямлячах з середньою точкою та мостового приведені на рисунку 1.2.

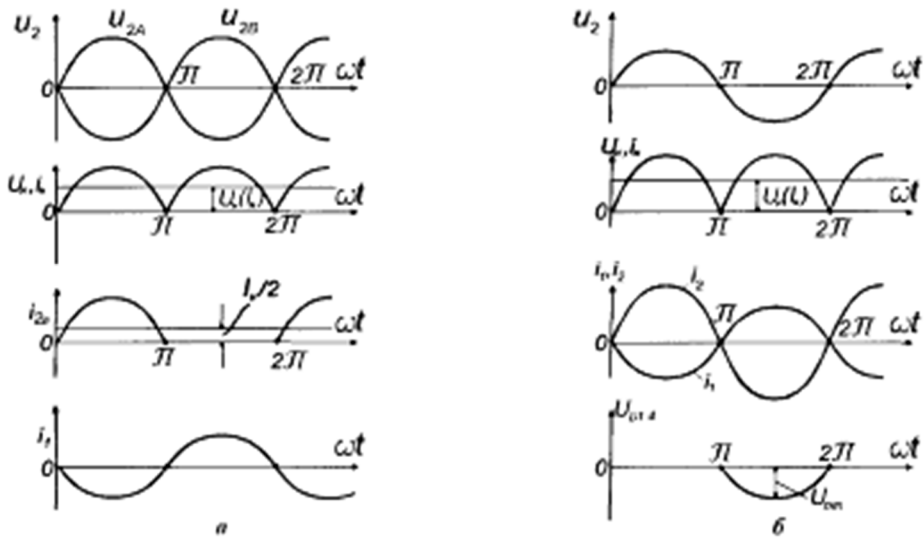


Рисунок 1.2 – Часові діаграми процесів в однофазних випрямлячах:

а – з середньою точкою; б – мостового

На схемах та часових діаграмах прийняті такі позначення:

U_2, I_2 – напруга на вторинній обмотці трансформатора та струм у ній;

U_H, I_H – напруга та струм в навантаженні;

ω – кругова частота мережі.

На рисунку 1.3 приведено схеми трьохфазних випрямлячів із середньою точкою та мостового.

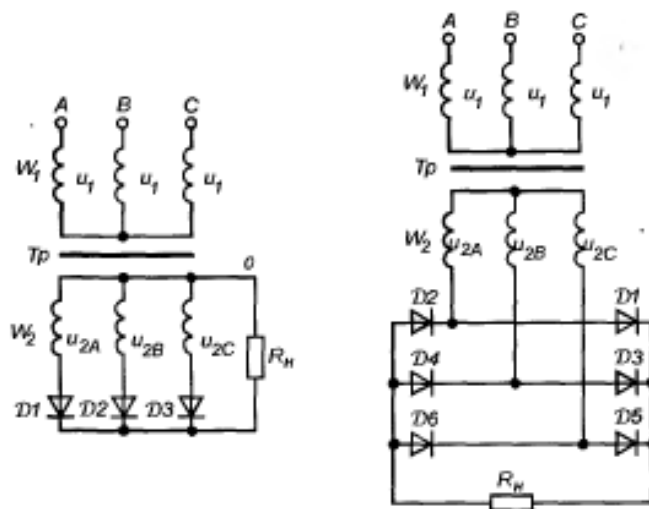


Рисунок 1.3 – Схеми трьохфазних випрямлячів:

а – з середньою точкою; б – мостового

Часові діаграми процесів у трьохфазних випрямлячах із середньою точкою та мостового приведені на рисунку 1.4.

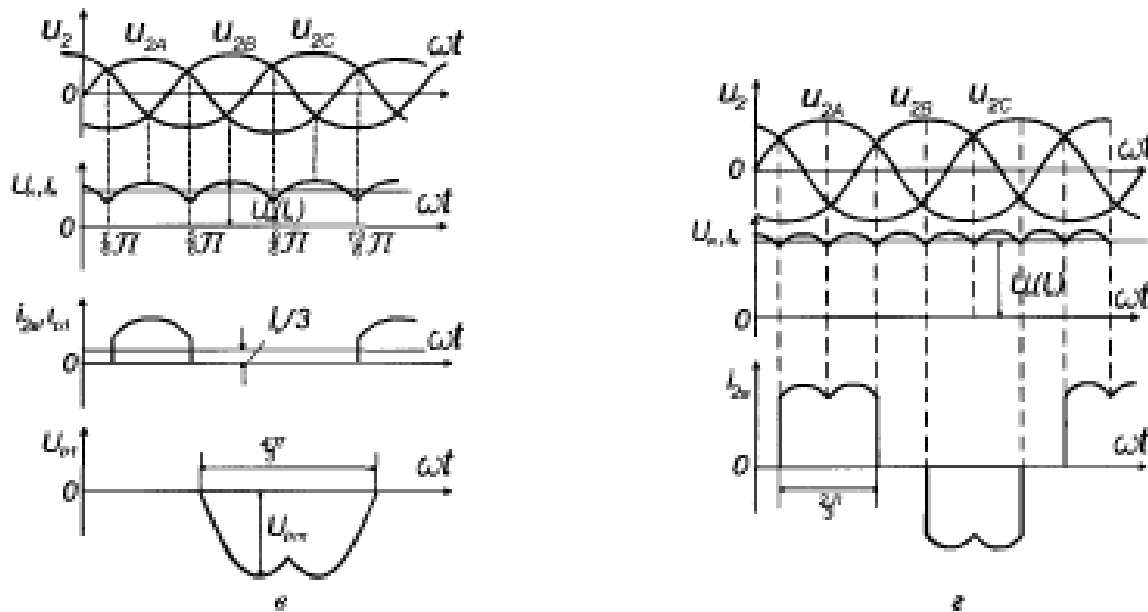


Рисунок 1.4 – Часові діаграми процесів у трьохфазних випрямлячах:
а – з середньою точкою; б – мостового

Як видно з рисунку 1.4, при використанні трьохфазної мостової схеми випрямляча число імпульсів випрямленої напруги за період мережі вдвічі більше числа фаз вторинної обмотки трансформатора.

Слід відзначити, що при використанні схеми випрямляча з середньою точкою наявність трансформатора обов'язкова. Втрати на вентилях у такій схемі приблизно в два рази менші, але напруга на вентилях у два рази більша, тому при високій випрямленій напрузі використовують мостову схему.

Контрольні запитання

1. Чи співпадають по фазі напруга та струм при використанні активного навантаження випрямляча?
2. Чи обов'язкова наявність трансформатора в схемі з середньою точкою?

3. Які пульсації напруги та струму в навантаженні випрямляча без фільтру?
4. Вказати недоліки схеми випрямляча з середньою точкою.
5. Вказати недоліки мостової схеми випрямляча.
6. Скільки вентилів працюють одночасно в схемі випрямляча з середньою точкою?
7. Скільки вентилів працюють одночасно в мостовій схемі випрямляча?
8. Де більші пульсації вихідної напруги: при використанні однофазної схеми випрямляча з середньою точкою чи однофазної мостової?
9. Де більші пульсації вихідної напруги: при використанні однофазної схеми випрямляча чи трьохфазної?
10. Де більші пульсації вихідної напруги: при використанні трьохфазної схеми випрямляча з середньою точкою чи трьохфазної мостової?

1.3 Робота випрямлячів на активно-ємнісне навантаження

Для згладжування пульсацій вихідної напруги випрямляча можуть використовуватись ємнісні фільтри. Схема однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром приведена на рисунку 1.5.

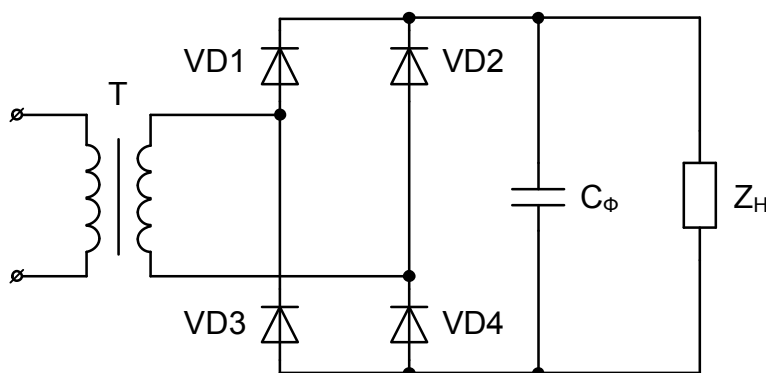


Рисунок 1.5 – Схема однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром

Часові діаграми процесів в однофазному мостовому випрямлячі з ємнісним фільтром приведені на рисунку 1.6.

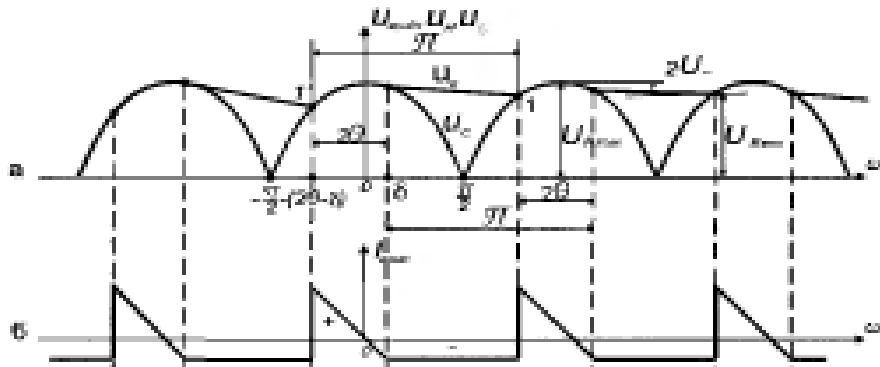


Рисунок 1.6 – Часові діаграми процесів в однофазному мостовому випрямлячі з ємнісним фільтром

Як видно з часових діаграм, після зарядження ємнісного фільтру струм через вентилі не проходить, тому що напруга на фільтрі вища за напругу випрямляча. В цей час ємність фільтру поступово розряджається на навантаження і відсутній провал напруги на навантаженні до нульового значення. Після перевищення напругою випрямляча напруги на фільтрі, останній знову заряджається. Чим більша ємність фільтру, тим менший провал напруги на навантаженні.

Половина часу, протягом якого струм протікає через вентиль, прийнято називати кутом відсічки – θ .

Якщо прийняти допущення, що індуктивність в навантаженні відсутня і враховується лише активний опір навантаження та вентилів в прямому напрямку, то струм на виході випрямляча розподілиться по двох паралельних ланках: змінна складова пройде через конденсатор, який представляє собою безкінечно малий опір для всіх гармонік струму, а постійна складова – через навантаження.

Таким чином, наявність ємності на виході випрямляча зменшує пульсації його вихідної напруги та забезпечує постійний за величиною струм у навантаженні.

Контрольні запитання

1. Де більші пульсації вихідної напруги при використанні однофазної схеми випрямляча – з фільтром чи без нього?
2. Яку функцію виконує ємність на виході випрямляча?
3. Скільки вентилів працює одночасно в схемі випрямляча, приведений на рис. 1.5?
4. Чи постійно працюють вентиля в схемі випрямляча, приведений на рис. 1.5?
5. Вказати, які пари вентилів працюють одночасно в схемі випрямляча, приведений на рис. 1.5?
6. Чи проходить струм через вентиля після зарядження ємнісного фільтра?
7. Чи постійна напруга на ємнісному фільтрі після його зарядження?

1.4 Робота випрямлячів на активно-індуктивне навантаження

Індуктивний фільтр використовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити безперебійність протікання струму в ланці навантаження та сприятливі умови для роботи випрямляча. Як правило, індуктивний фільтр використовують, коли потрібно суттєво зменшити пульсації струму в ланці навантаження, яке має малу індуктивність.

На рисунку 1.7 представлено однофазний випрямляч, виконаний за мостовою схемою з фільтром, причому однофазний випрямляч включений на активно-індуктивне навантаження. Як індуктивний фільтр використовується дросель L_f .

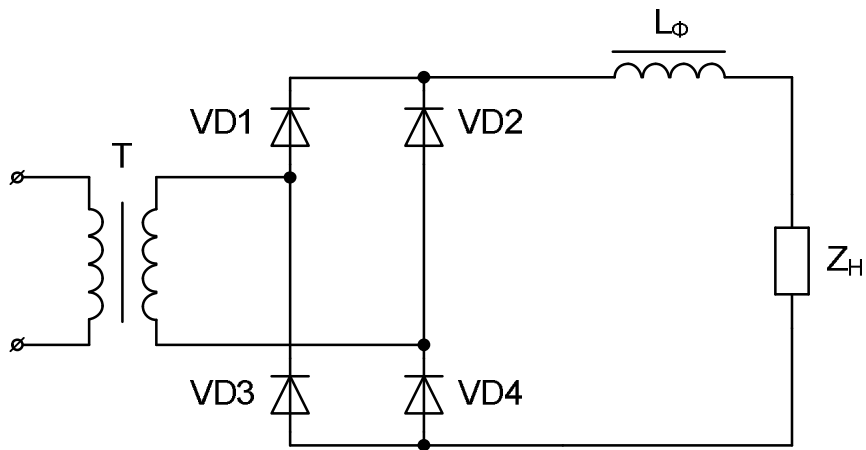


Рисунок 1.7 – Схема однофазного випрямляча з індуктивним фільтром та активно-індуктивним навантаженням

Контрольні запитання

1. Для чого використовують електричний фільтр на виході випрямляча?
2. Які пульсації напруги й струму в навантаженні випрямляча без фільтра?
3. Чи співпадають за фазою напруга і струм при використанні активно-індуктивного навантаження випрямляча?
4. Де використовуються індуктивні фільтри?
5. Чи рекомендується використовувати для потужних випрямлячів фільтри з ємнісною вхідною ланкою?
6. Для згладжування пульсацій якого вихідного параметру випрямлячів використовуються індуктивні фільтри?
7. В яких випадках використовують індуктивний фільтр?

1.5 Розрахунок параметрів силового випрямляча

Розглянемо, як виконується розрахунок параметрів силового випрямляча, який використовується в складі перетворювача частоти, якщо він некерований і виконаний по трифазній мостовій схемі.

Вибір вентилів здійснюється по двох параметрах:

- середньому струму через вентиль I_B ;
- максимальній допустимій напрузі на вентилі U_B .

Для трифазної мостової схеми:

$$U_B = 1,05 \cdot U_{do} , \quad (1.1)$$

$$I_B = 0,33 \cdot I_d , \quad (1.2)$$

Вихідна напруга ідеального холостого ходу випрямляча:

$$U_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{BX} . \quad (1.3)$$

Номінальне значення струму I_d у ланці постійного струму визначається на основі балансу активної потужності на вході і виході автономного інвертора:

$$P_1 = P_d , \quad (1.4)$$

або

$$\sqrt{3}U_{BX} \cdot I_{BX} \cdot \cos \varphi = U_d \cdot I_d , \quad (1.5)$$

де U_{BX} – номінальна вихідна напруга інвертора, В;

I_{BX} – номінальний вихідний струм інвертора, А;

$\cos \varphi$ – косинус кута здви́гу фаз між першими гармоніками вихідних струму та напруги інвертора.

У мережі можливі короткочасні перенапруження, що досягають $1,5U_{BX}$, отже вентиля повинні вибиратися з урахуванням цього фактору.

Вибір реакторів на вході випрямляча здійснюється з умов обмеження струму короткого замикання, яке може виникнути в силовому випрямлячі.

Основною умовою при виборі вважаємо наступне:

$$I_{\text{АВАРИЙНИЙ}} < I_{\text{УД}} , \quad (1.6)$$

де $I_{\text{УД}}$ – допустимий ударний струм вентиля.

З урахуванням коливання напруги мережі на 10% індуктивність вхідного реактора визначається за формулою:

$$L \geq \frac{1,1 \cdot U_{\text{ВХ}} \cdot \sqrt{2}}{2\omega \cdot I_{\text{УД}}} . \quad (1.7)$$

Вибираємо тип реактора по значенню струму й індуктивності. Перевіримо, чи забезпечить трифазний мостовий випрямляч, що живиться від мережі, необхідну напругу для автономного інвертора. Для вибраного реактора та вибраного вентиля падіння напруги дорівнює ΔU .

Тоді:

$$U_d = U_{d0} - I_d \frac{X_d}{3} - 2\Delta U . \quad (1.8)$$

1.6 Розрахунок параметрів фільтру

Розглянемо, як виконується розрахунок параметрів LC-фільтру, який використовується на виході випрямляча, виконаного за трифазною мостовою схемою, що входить до складу перетворювача частоти.

Дросель у ланці постійного струму обмежує пульсації струму випрямляча й аварійний струм при прориві автономного інвертора.

Індуктивність дроселя L_d визначається з умови обмеження пульсацій випрямленого струму на рівні 10% від $I_{dн}$

$$\Delta I = 0,1 \cdot I_{dн} . \quad (1.9)$$

Перша гармоніка пульсації напруги в ланці постійної напруги:

$$\Delta U_1 = 0,06 \cdot U_d . \quad (1.10)$$

Пульсації струму в ланці постійної напруги:

$$\Delta I_d = 0,1 \cdot I_{dH} . \quad (1.11)$$

Частота пульсацій дорівнює 6ω . Тоді Індуктивність дроселя L_d :

$$L_d \geq \frac{\Delta U_1}{6\omega \cdot \Delta I_d} . \quad (1.12)$$

Величина місткості конденсатора фільтру визначається з умови допустимості рівня пульсацій напруги на конденсаторі.

Для визначення місткості конденсаторів фільтру необхідно визначити діюче значення струму через них, причому в якнайгіршому режимі. Цей струм можна представити у вигляді трьох складових:

- змінної складової струму випрямляча $\Delta I = 0,1 \cdot I_{dH}$;
- змінної складової ΔI_{H1} вхідного струму інвертора I_H , обумовленою гармонікою струму навантаження $\Delta I_{вих}$;
- змінної складової ΔI_{HK} вхідного струму інвертора I_H , обумовленої вищими гармоніками струму $\Delta I_{вих}$.

Форма кривої вхідного струму інвертування I_H , обумовлена основною гармонікою струму навантаження, є послідовністю ділянок синусоїд тривалістю $\pi/3$ радіан.

Змінна складова визначається різницею:

$$\Delta I_{H1} = I_{H1} - I_d . \quad (1.13)$$

Діюче значення змінної становить:

$$\Delta I_{H1} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \left[\int_{\pi/3-4}^{(2/3)\cdot\pi-4} (\sqrt{2} I_{\text{вих}} \cdot \sin \omega t)^2 d\omega t - \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{\text{вих}} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right]}, \quad (1.14)$$

або

$$\Delta I_{H1} \approx 0,416 \cdot I_{\text{вих}} \cdot \sin \varphi. \quad (1.15)$$

При розрахунку складової вхідного струму інвертора, обумовленої вищими гармоніками струму навантаження, вважаємо, що для останніх електродвигун має лише індуктивний опір короткого замикання X_k .

Миттєве значення вищих гармонік струму на вході інвертора в цьому випадку визначається різницею двох складових:

- струму, що відповідає реальній східчастій кривій вихідної напруги (за відсутності ШІМ на номінальній частоті);
- струму, що визначається основною гармонікою цієї напруги:

$$\Delta I_{\text{нк}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_d}{X_k} \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) - \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{вих}}}{\sqrt{3} \cdot X_k} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right), \quad (1.16)$$

причому

$$0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}. \quad (1.17)$$

У вказаному діапазоні зміни ωt аргумент \sin міняється від $-\pi/6$ до $+\pi/6$ і ним можна замінити функцію \sin . Замінімо U_d його виразом через $U_{\text{вих}}$, а останнє представимо у вигляді падіння напруги на повному опорі навантаження ZI від струму першої гармоніки.

Тоді одержуємо:

$$\Delta I_{\text{нк}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{\text{вих}} \cdot \frac{Z_1}{X_k} \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \left(\frac{\pi}{3} - 1 \right). \quad (1.18)$$

Діюче значення цього струму:

$$\Delta I_{\text{нк}} = I_{\text{вих}} \cdot 0,02 \frac{Z_1}{X_k} . \quad (1.19)$$

Якщо прийняти:

$$\frac{Z_1}{X_k} = 5 ,$$

$$\text{а } \cos\varphi_{\text{мін}} = 0,4 ,$$

то сумарні пульсації ΔI_c струму конденсаторів фільтру будуть найбільшими, коли три вказані складові струму співпадуть за частотою й стануть синфазні:

$$I_c = \Delta I_d + \Delta I_{H1} + \Delta I_k , \quad (1.20)$$

або

$$I_c = 0,1 I_d + 0,416 I_{\text{вих}} \cdot \sin\varphi + \Delta I_{\text{вих}} \cdot 0,1 . \quad (1.21)$$

Місткість конденсаторів фільтру визначається виразом:

$$C \geq \frac{\Delta I_c}{\Delta U_c \omega} , \quad (1.22)$$

де ΔU_c – допустима величина змінної складової на місткості фільтру, яку можна прийняти рівною $\Delta U_c = 25 \text{ В}$.

2 ТИРИСТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При практичному використанні випрямлячів часто зустрічаються схеми, де в якості навантаження використовують двигуни постійного струму. У таких випадках говорять, що випрямляч працює на навантаження з проти-ЕРС.

Поява проти-ЕРС у навантаженні однофазного випрямляча суттєво змінює режим роботи вентилів у порівнянні з активним навантаженням. У цьому випадку струм в навантаженні й вентилях протікає лише в ті моменти часу, коли ЕРС вторинної обмотки трансформатора перевищує значення проти-ЕРС (див. рис. 2.1).

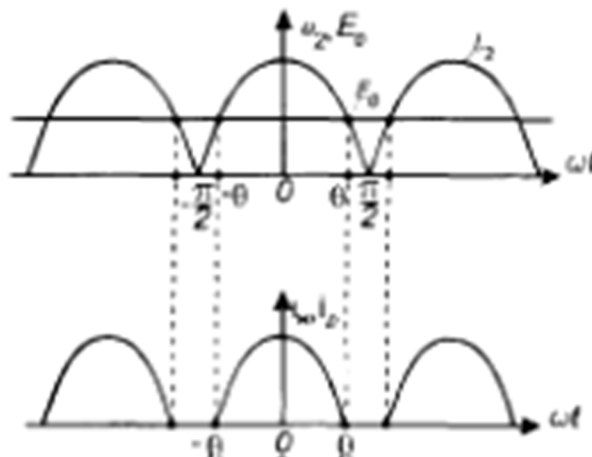


Рисунок 2.1 – Часові діаграми процесів в однофазному випрямлячі при роботі на проти-ЕРС

З метою зменшення пульсацій струму в схемах із двигунами постійного струму доцільно ставити в ланку навантаження індуктивний фільтр (дросель).

Коли прийняти допущення, що індуктивність дроселя безкінечно велика, то можна вважати, що однофазний випрямляч працює з активно-індуктивним навантаженням при ідеальній фільтрації струму в ланці навантаження. Це пов'язано з тим, що в ланці з постійним струмом активний опір, на якому буде постійне падіння напруги, згідно з теоремою про компенсацію можна замінити постійною проти-ЕРС і навпаки.

Якщо ж індуктивність дроселя є реальною величиною, то в навантаженні будемо мати пульсуючу форму струму.

На рисунку 2.2 наведено схему однофазного керованого мостового випрямляча з індуктивним фільтром та електродвигуном постійного струму в навантаженні.

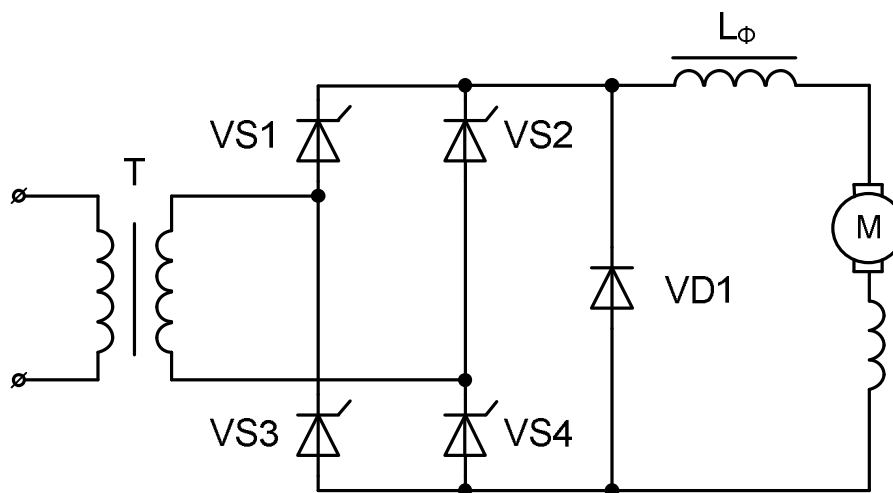


Рисунок 2.2 – Схема однофазного керованого мостового випрямляча з індуктивним фільтром та електродвигуном постійного струму в навантаженні

Для забезпечення можливості змінювати оберти електродвигуна постійного струму і тим самим регулювати проти-ЕРС, однофазний випрямляч зроблено керованим.

Вентиль $VD1$ необхідний для одержання контуру протікання струму в навантаженні в моменти часу, коли тиристори однофазного випрямляча закриті.

Контрольні запитання

1. В яких випадках говорять, що випрямляч працює на навантаження з проти-ЕРС?
2. До чого призводить поява проти-ЕРС в навантаженні однофазного випрямляча в порівнянні з активним навантаженням?

3. Який електричний фільтр використовують на виході випрямляча з метою зменшення пульсацій струму?
4. Які пульсації напруги та струму в навантаженні випрямляча без фільтра?
5. Якщо індуктивність дроселя є реальною величиною, то в навантаженні будемо мати яку форму струму?
6. Для чого однофазний випрямляч в схемі зроблено керованим?
7. Для чого в схемі необхідний вентиль VD1?

3 ВИКОРИСТАННЯ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ В СИЛОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

В електроприводах постійного струму необхідно плавно змінювати напругу на обмотках електродвигуна. Таку функцію виконує імпульсний перетворювач постійної напруги. В імпульсному перетворювачі за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) безперервна напруга контактної мережі перетворюється в послідовні імпульси, ширина яких змінюється в залежності від того, яку напругу необхідно мати на обмотках електродвигуна. Розглянемо роботу імпульсного перетворювача в складі електроприводу постійного струму на спрощеній схемі в режимі пуску, приведений на рисунку 3.1.

В даній схемі вхідний індуктивно-ємнісний фільтр L_f , C_f служить для обмеження перенапруги на імпульсному перетворювачі при його запиранні, а також для згладжування пульсацій струму у контактній мережі.

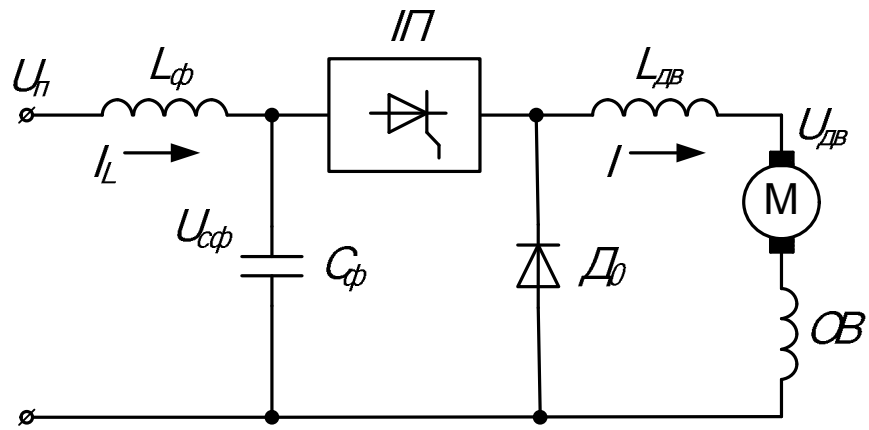


Рисунок 3.1 – Принципова схема імпульсного регулювання напруги на обмотках електродвигуна за рахунок ШІМ в режимі пуску

Графіки струму і напруги при імпульсному регулюванні напруги на обмотках електродвигуна за рахунок ШІМ приведені на рисунку 3.2.

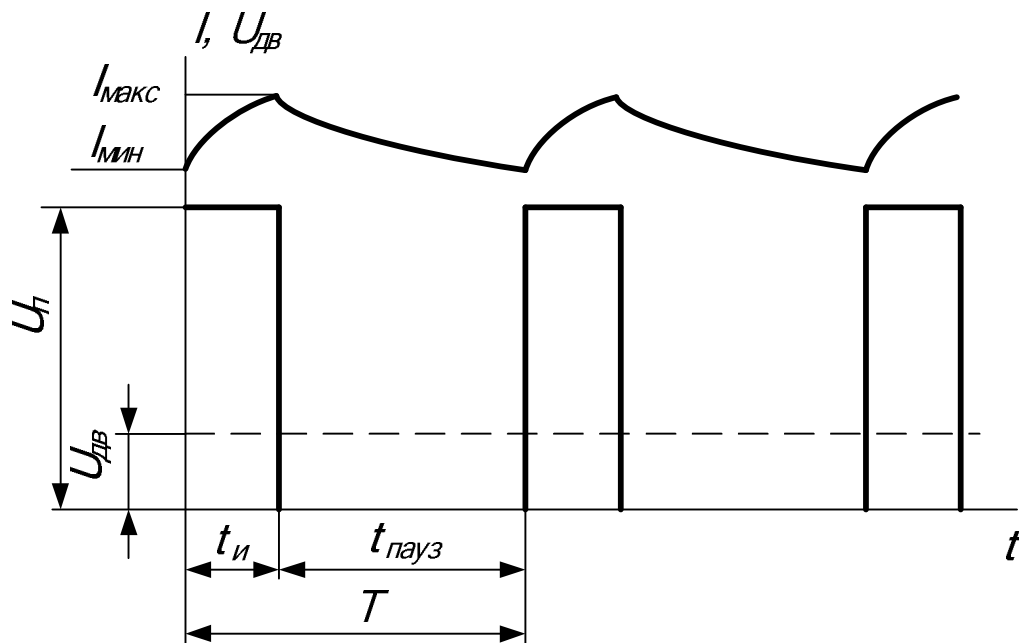


Рисунок 3.2 – Графіки струму і напруги при імпульсному регулюванні напруги на обмотках електродвигуна за рахунок ШІМ

Напруга на електродвигуні змінюється періодичним вмиканням і запиранням імпульсного перетворювача. Протягом часу імпульсу $t_{и}$ імпульсний перетворювач відкритий і до ланцюга електродвигуна прикладена напруга $U_{сф}$, середнє значення якої можна прийняти рівним напрузі джерела живлення:

$$U_{сф} = U_{п}, \quad (3.1)$$

якщо зневажити порівняно малим падінням напруги в омичному опорі дроселя $L_{ф}$. При цьому струм у електродвигуні зростає по експоненті від $I_{мін}$ до $I_{макс}$ і енергія з контактної мережі й конденсатора $C_{ф}$ витрачається не тільки для виконання роботи електродвигуна і подолання втрат за час $t_{и}$, але й запасається в індуктивностях, а потім витрачається на виконання роботи електродвигуна і на втрати під час паузи $t_{пауз}$. При запиранні імпульсного перетворювача струм у ланцюзі електродвигуна зменшується, в його обмотках і дроселі $L_{д}$ виникає ЕДС самоіндукції, під дією якої струм у електродвигуні продовжує протікати, замикаючись через нульовий діод *До*.

Середнє значення вихідної напруги імпульсного перетворювача:

$$U_{сф} = \frac{t_{и}}{T} \cdot U_{п} \quad (3.2)$$

де T – період, який не змінюється в часі.

При постійному середньому струмі через електродвигун $I = \text{const}$ спостерігається прямолінійна залежність між кутовою швидкістю електродвигуна ω і коефіцієнтом заповнення λ :

$$\lambda = \frac{t_{и}}{T}. \quad (3.3)$$

При значеннях $\lambda=0$ і $\lambda=1$, що визначають межі імпульсного регулювання, маємо:

$$\Delta I = I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}} = 0. \quad (3.4)$$

Перша межа ($\lambda=0$) не має практичного значення. Формально її одержують при $t_{\text{и}}=0$.

Друга межа ($\lambda=1$) настає при виході на автоматичну характеристику електродвигуна, коли імпульсний перетворювач відкритий весь час.

Крім режиму пуску, імпульсні перетворювачі з ШІМ використовуються в режимах рекуперативного й реостатного гальмування та для регулювання збудження тягового електродвигуна.

Принципова схема рекуперативного й реостатного гальмування складається з тих самих елементів, що й схема імпульсного перетворювача в режимі пуску, але змінено їхнє з'єднання (див. рис. 3.3).

Імпульсний перетворювач включений паралельно навантаженню, а зворотний діод D_o пропускає струм рекуперації $i_{\text{рек}}$ і перешкоджає протіканню струму із джерела живлення в ланцюг електродвигуна.

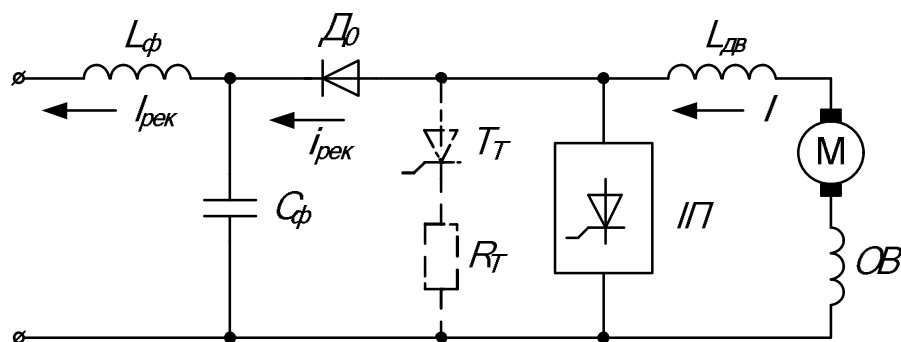


Рисунок 3.3 – Принципова схема імпульсного керування ТЕД
у режимі гальмування

Штриховою лінією показаний ланцюг гальмового реостата R_T , що підключається автоматично при вмиканні тиристора T_m , коли підвищується напруга на конденсаторі C_ϕ вище допустимого значення. Для обмеження

пульсації струму в електродвигуні служить дросель $L_{\partial\partial}$, а для обмеження пульсацій струму в контактній мережі – фільтр C_{ϕ} , L_{ϕ} . При вмиканні імпульсного перетворювача в інтервалі t_u для електродвигуна утворюється короткозамкнений контур. Енергія, що виробляється в електродвигуні в генераторному режимі, за винятком втрат в активних опорах контуру накопичується в індуктивностях обмоток електродвигуна і дроселя $L_{\partial\partial}$. При цьому струм I в електродвигуні зростає, а струм через зворотний діод $i_{рек} = 0$. При запиранні імпульсного перетворювача струм I в електродвигуні зменшується, а в обмотках електродвигуна і дроселі виникає ЕДС самоіндукції, під дією якої напруга на імпульсному перетворювачі стає вищою за напругу на фільтрі й струм через D_o надходить у контактну мережу $i_{рек} = I$. Таким чином, на вхід фільтра L_{ϕ} , C_{ϕ} електроенергія рекуперації надходить імпульсами:

$$A_{п.рек} = U_{сф} \cdot i_{рек} \cdot t_{пауз}. \quad (3.5)$$

Струм у контактну мережу тече безупинно завдяки нагромадженню енергії у фільтрі під час t_u і віддачі її в мережу під час $t_{пауз}$.

Середній струм рекуперації дорівнює:

$$I_{рек} = I \cdot \frac{t_{пауз}}{T} = I(1 - \frac{t_u}{T}) = I(1 - \lambda). \quad (3.6)$$

Якщо зневажити відносно малою середньою напругою на дроселі L_{∂} , то середня напруга на ТЕД:

$$U_{дв} \approx U_{п} \cdot \frac{t_{пауз}}{T} = U_{п} \cdot (1 - \lambda). \quad (3.7)$$

Пульсації струму в електродвигуні при рекуперативному гальмуванні аналогічні режиму пуску, причому максимальні пульсації струму досягають при $\lambda=0,5$. Процес рекуперації енергії в контактну мережу закінчується при $\lambda=1$.

Імпульсний регулятор регулювання збудження тягового електричного двигуна можна виконати за схемою, приведеною на рисунку 3.4.

Імпульсне регулювання збудження тягового електричного двигуна здійснюється зміною коефіцієнта заповнення λ імпульсів напруги на обмотці збудження. Таке регулювання можна одержати при різних способах включення імпульсного перетворювача. На рисунку 3.4 імпульсний регулятор регулювання збудження тягового електричного двигуна включений паралельно його обмотці збудження ОВ.

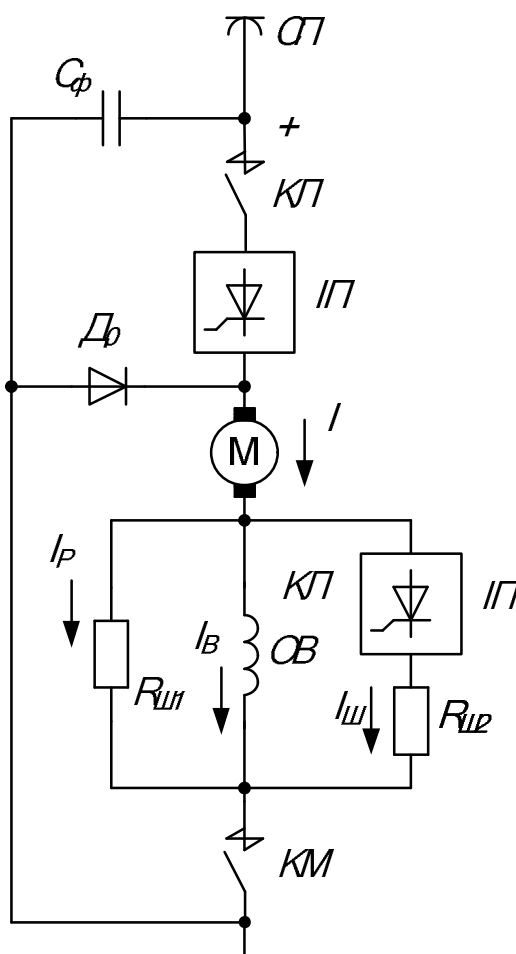


Рисунок 3.4 – Принципова схема імпульсного регулятора регулювання збудження тягового електричного двигуна

При вимкненому імпульсному регуляторі обмотка збудження шунтована значним опором $R_{ш1}$. При цьому початковий коефіцієнт ослаблення поля $\alpha_{нач}$ визначається опором $R_{ш1}$.

Опір $R_{ш1}$ значною мірою визначає нахил характеристики регулювання поля $\alpha(\lambda_n)$. Чим менше значення опору $R_{ш1}$, тим більш сприятлива характеристика $\alpha(\lambda)$ та менший її максимальний нахил. Однак зі зменшенням $R_{ш1}$ збільшується початкове ослаблення поля $\alpha_{нач}$, що знижує значення пускового моменту. Крім того, при малих значеннях опору $R_{ш1}$ можливі значні поштовхи струму в якорі електродвигуна при відновленні напруги в контактній мережі після короткочасного провалу або зникнення його. Вибір $R_{ш1}$ можна проводити за умови одержання $\alpha_{нач} \geq 0.95 \div 0.97$.

При відкритому імпульсному регуляторі обмотка збудження шунтована малим опором:

$$R_{шов} = \frac{R_{ш1} \cdot R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}, \quad (3.8)$$

що відповідає максимальному ослабленню поля. У процесі підвищення кутової швидкості електродвигуна після завершення роботи регулятора напруги ($\lambda = 1$) вступає в дію імпульсний регулятор ослаблення поля, у якого поступово збільшується коефіцієнт заповнення λ_n і відповідно зменшується α . Після завершення регулювання імпульсний регулятор ослаблення поля залишається відкритим ($\lambda_n=1$) і забезпечується $\alpha_{мін}$. При виборі $R_{ш2}$ по $\alpha_{мін}$ варто враховувати спадання напруги на головному тиристорі імпульсного регулятора ослаблення поля, особливо в тому випадку, коли $\alpha_{мін}$ вибирають для заданої сталої швидкості, при якій звичайно невеликий струм у електродвигуна і відповідно мале спадання напруги на обмотці збудження. ШІМ використовується також в автономних інверторах напруги.

Контрольні запитання

1. У яких випадках використовують імпульсні перетворювачі постійної напруги?

2. За рахунок якого параметру регулюється напруга в навантаженні імпульсного перетворювача при використанні ШІМ?
3. Що таке коефіцієнт заповнення?
4. В якому випадку коефіцієнт заповнення дорівнює нулю?
5. У якому випадку коефіцієнт заповнення дорівнює одиниці?
6. Яка ширина імпульсу напруги у випадку, коли коефіцієнт заповнення дорівнює одиниці?
7. Яка ширина імпульсу напруги у випадку, коли коефіцієнт заповнення дорівнює нулю?
8. В яких силових перетворювачах крім імпульсних перетворювачів постійної напруги використовується ШІМ?

4 БЕЗПОСЕРЕДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Перетворювачі частоти – це пристрої, призначені для перетворення змінного струму однієї частоти в змінний струм іншої частоти. Перетворювачі частоти розподіляються на два класи:

- перетворювачі частоти з ланкою постійного струму;
- перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком, або безпосередні перетворювачі частоти.

Безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ) в свою чергу діляться на перетворювачі частоти природною та штучною комутацією.

Розглянемо роботу безпосереднього перетворювача частоти на прикладі схеми трьохфазно-однофазного БПЧ з природною комутацією, приведеною на рисунку 4.1.

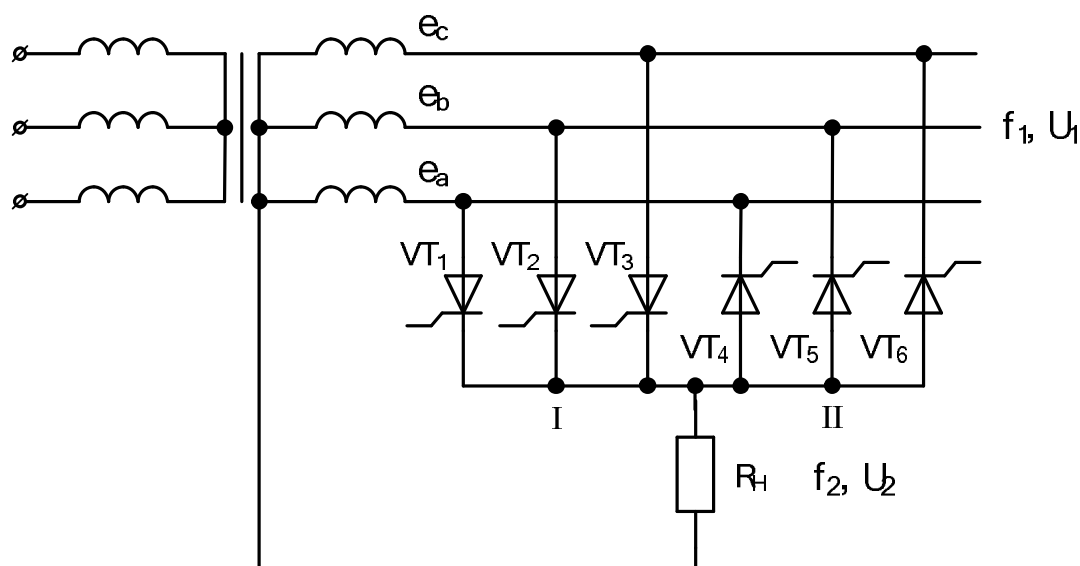


Рисунок 4.1 – Схема трьохфазно-однофазного БПЧ з природною комутацією

Перетворювач складається з двох трьохфазних випрямлячів, один з яких підключений до фаз трансформатора анодами, а інший – катодами. Позитивний півперіод вихідної напруги формується за рахунок почергового переключення тиристорів першої групи і відповідного підключення навантаження до однієї з фаз мережі живлення. Таке переключення можливе у випадку, якщо потенціал фази, до якої підключається навантаження, більше потенціалу фази, до котрої воно було підключене (див. рис. 4.2).

Від’ємні півперіоди вихідної напруги формуються за рахунок почергового переключення тиристорів другої групи і відповідного підключення навантаження до однієї з фаз мережі живлення.

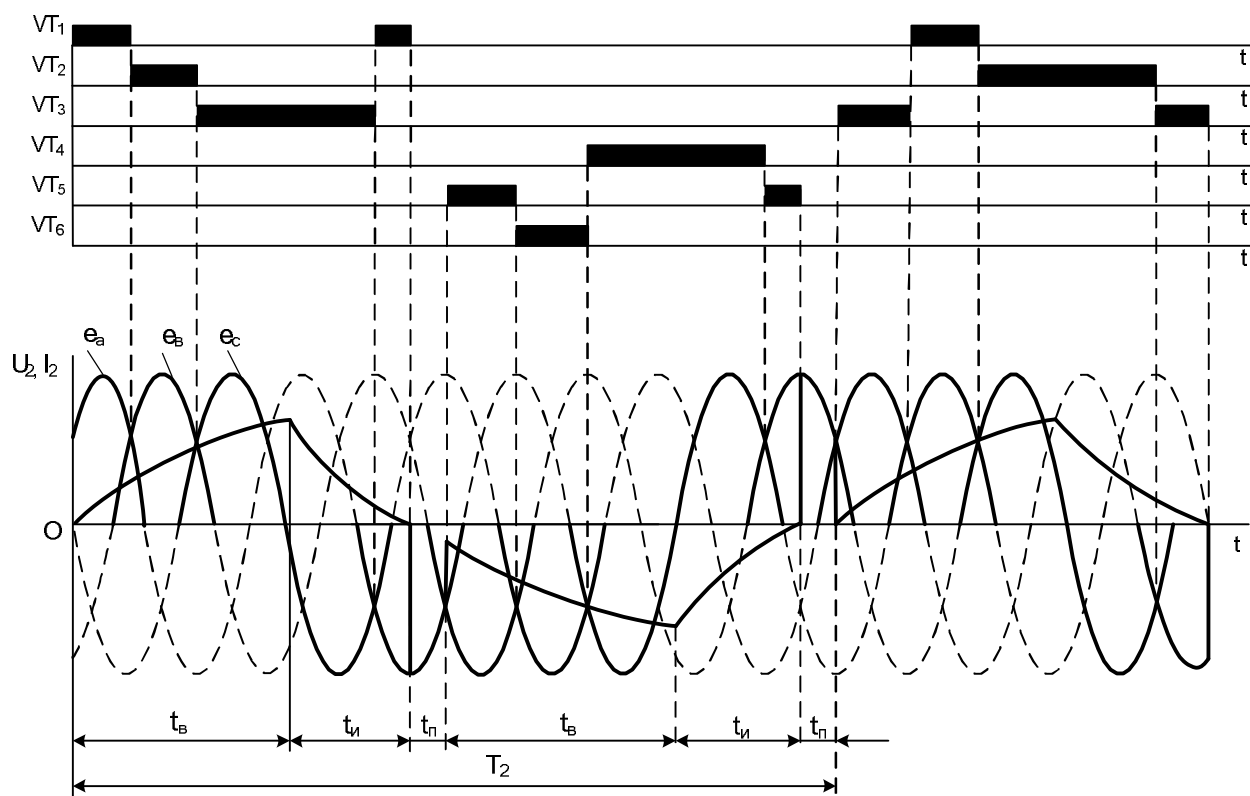


Рисунок 4.2 – Часові діаграми напруги та струмів при роботі БПЧ
з природною комутацією

З рисунку 4.2 зрозуміло, що частота вихідної напруги БПЧ нижча за частоту мережі живлення і дорівнює:

$$f_2 = \frac{f_1 \cdot m_1}{2k + m_1}, \quad (4.1)$$

де f_1 – частота мережі живлення;

m_1 – число фаз мережі живлення;

$(k + 1)$ – число півхвиль напруги живлення.

При цьому зміна частоти f_2 відбувається дискретно. Для одержання плавного регулювання частоти f_2 необхідно, щоб між виключенням та включенням груп тиристорів була пауза.

Контрольні запитання

1. Для чого призначені перетворювачі частоти?
2. На які два класи поділяються перетворювачі частоти?
3. На які дві групи діляться БПЧ?
4. Який основний недолік БПЧ?
5. Які значення частоти напруги на виході БПЧ можна отримати відносно частоти живлення?
6. Від чого залежить частота напруги на виході БПЧ?
7. Як змінюється частота напруги на виході БПЧ?
8. Що необхідно для одержання плавного регулювання частоти f_2 ?

5 ІНВЕРТОРИ СТРУМУ ТА НАПРУГИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Інвертори – це пристрої, що перетворюють потужність постійного струму в потужність змінного струму.

Інвертори можна класифікувати за такими ознаками:

- автономні й ведені мережею;
- інвертори струму й інвертори напруги;
- однофазні, трифазні, багатофазні та ін.

Автономні інвертори – це пристрої, що перетворюють постійний струм у змінний із постійною чи регульованою частотою й мають автономне навантаження.

В автономних інверторах (AI), на відміну від інверторів, ведених мережею, процес комутації ключів ніяким чином не пов'язаний із напругою живильної мережі. Тому AI може працювати з навантаженням, у складі якого немає джерела змінної напруги.

За способом комутації автономні інвертори можна розділити на декілька груп:

- інвертори з індивідуальною комутацією – комутуючий пристрій такого інвертора служить для запирання одного тиристора (вентильного плеча);
- інвертори з пофазовою комутацією – комутуючий пристрій інвертора служить для почергового запирання тиристорів двох вентильних плечей, що відносяться до однієї фази інвертора;
- інвертори з груповою комутацією – для запирання всіх вентильних плечей однієї групи служить окремий комутуючий пристрій;
- інвертори з загальною комутацією – комутуючий пристрій є загальним для всіх вентильних плечей інвертора;
- інвертори з між фазовою комутацією.

За способом керування інвертори поділяються на інвертори з самозбудженням і зовнішнім (незалежним) збудженням.

В інверторах із самозбудженням керуючі імпульси, що подаються на тиристори, формуються з вихідної напруги інвертора. Частота вихідної напруги визначається параметрами навантаження.

В інверторах з незалежним збудженням керуючі імпульси формуються зовнішнім генератором, що й задає частоту вихідної напруги. Зважаючи на те, що частота вихідної напруги не залежить від параметрів навантаження, цей тип інверторів отримав найбільш широке розповсюдження в перетворюючій техніці.

В залежності від особливостей протікання електромагнітних процесів автономні інвертори можна поділити на інвертори струму й інвертори напруги.

Більш детально автономні інвертори струму і напруги розглянуто нижче.

Контрольні запитання

1. Що таке інвертор?
2. Як можна класифікувати інвертори за такими ознаками, як ступінь автономності?

3. Як можна класифікувати автономні інвертори як джерела живлення?
4. Як можна класифікувати автономні інвертори за кількістю фаз вихідної напруги?
5. Що таке автономний інвертор?
6. У яких інверторів процес комутації ключів ніяким чином не пов'язаний із напругою живильної мережі?
7. Як автономні інвертори різняться за способом комутації?
8. Як автономні інвертори різняться за способом керування?
9. Який тип інверторів отримав найбільш широке розповсюдження в перетворюючій техніці?

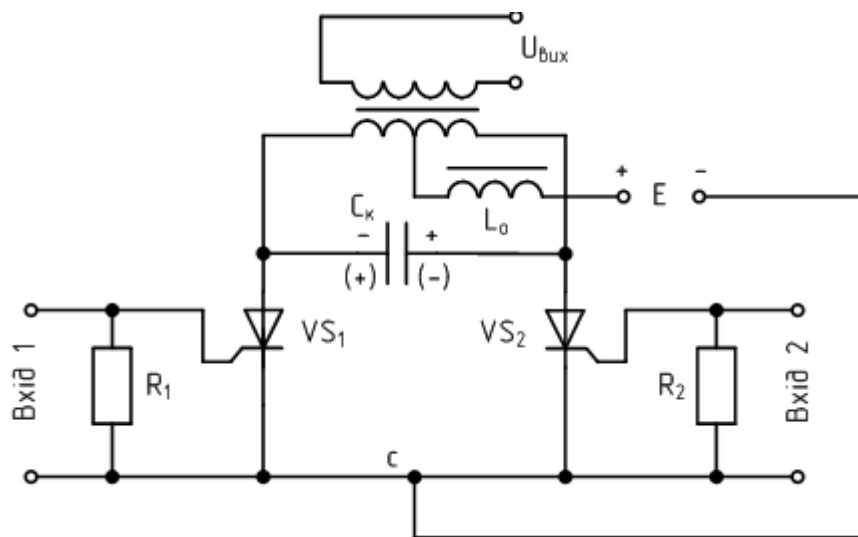
5.1 Автономні інвертори струму

Для автономного інвертора струму (АІС) характерним є те, що він формує в навантаженні струм, а форма й фаза вихідної напруги залежать від параметрів навантаження. Живлення АІС відбувається від джерела, що працює в режимі генератора струму. Для цього у вхідному ланцюзі АІС вмикається реактор із великою індуктивністю. Реактор виконує також функцію фільтра вищих гармонічних напруги, оскільки до нього в будь-який момент часу прикладається різниця між незмінною напругою джерела живлення й пульсуючою напругою на вході інвертора. Крім того, реактор перешкоджає розряду конденсатора, що стоїть у ланці навантаження, на джерело живлення під час комутації струму в тиристорах та забезпечує аперіодичний режим роботи інвертора, характерний малими пульсаціями вихідного струму.

Інвертор струму має забезпечувати режим роботи, при якому між анодом і катодом зачиненого тиристора протягом деякого часу підтримується від'ємна напруга, необхідна для відновлення замикаючих властивостей тиристора. Цей час називається часом виключеного стану.

При активно-індуктивному характері споживача баланс реактивної потужності забезпечується комутуючими конденсаторами. Конденсатори по

Розглянемо принцип роботи автономного інвертора струму на прикладі однофазного паралельного інвертора струму з середньою точкою, приведеного на рисунку 5.1.



Часові діаграми, приведені на рисунку 5.2, ілюструють роботу однофазного паралельного автономного інвертора струму з середньою точкою.

На керуючі електроди тиристорів VS_1 та VS_2 від системи керування (СК) поступають імпульси керування відповідної амплітуди й частоти з відносним зсувом фаз у 180° . У ланцюг джерела живлення введено дросель L_0 з досить великою індуктивністю, завдяки чому вхідний струм I_d ідеально згладжений, а струм через тиристори має прямокутну форму. При вмиканні, наприклад, тиристора VS_1 в його анодному ланцюзі починає протікати струм, що визначається струмом заряду конденсатора C_k і струмом в одній половині обмотки трансформатора Tr . Внаслідок явища взаємоіндукції при проходженні зростаючого струму i_1 в одній половині обмотки трансформатора Tr , в іншій

виникає рівна по величині е.р.с. Конденсатор C_k до кінця півперіоду виявляється зарядженим до напруги u_c .

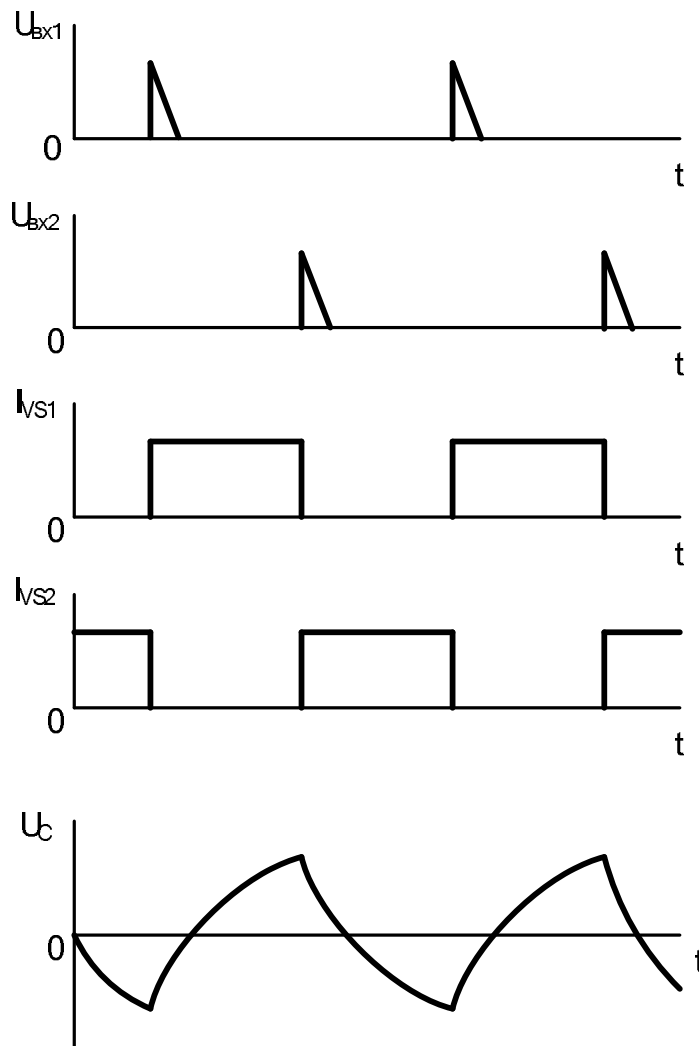


Рисунок 5.2 – Часові діаграми роботи однофазного паралельного автономного інвертора струму з середньою точкою

При ввімкненні тиристора VS_2 утворюється ланцюг для розрядження конденсатора C_k через тиристор VS_1 . Під дією розрядного струму конденсатора C_k , направленої назустріч анодному струму тиристора VS_1 , останній замикається. Комутація струму відбувається практично миттєво, тому що індуктивності розсіювання обмоток трансформатора знаходяться поза контуром комутації. Конденсатор C_k через тиристор VS_2 починає розряджатися і набуває протилежної полярності. В результаті через вторинну обмотку

трансформатора T_p проходить змінний струм. Слід відмітити, що при увімкненні наступного тиристора, одночасно з розрядженням конденсатора C_k по контуру двох відкритих тиристорів, відбувається також його розрядження на первинну обмотку трансформатора. При цьому частина енергії конденсатора переходить до енергії індуктивностей контуру, а частина розсіюється в його активних опорах.

При вмиканні тиристора VS_i весь процес повторюється. До тиристора, що вимикається, прикладається напруга конденсатора C_k , який перезаряджається і протягом часу $t_{вимк}$ підтримує на тиристорі від'ємну напругу.

В режимі холостого ходу інвертор струму не може працювати внаслідок росту амплітуди зворотних і прямих напруг на тиристорах, що є його суттєвим недоліком. При перевантаженнях робота АІС ускладнена через недостатність часу для відновлення замикаючих властивостей тиристорів. Інвертори струму мають близьку до синусоїдальної форму вихідної напруги та прямокутну форму вихідного струму, відносно малі пульсації вхідного струму. Зовнішня характеристика інвертора струму м'яка.

Контрольні запитання

1. Що є характерним для автономного інвертора струму?
2. Від чого залежать форма і фаза вихідної напруги у автономного інвертора струму?
3. Чи може інвертор струму працювати в режимі холостого ходу?
4. Чи може інвертор струму працювати при перевантаженнях?
5. Яку форму вихідної напруги має інвертора струму?
6. Яку форму вихідного струму має інвертора струму?
7. Як по відношенню до навантаження можуть бути увімкненими конденсатори у автономного інвертора струму?
8. Як називаються автономні інвертори струму з паралельно включеними конденсаторами?

5.2 Автономні інвертори напруги

Автономні інвертори напруги (АІН) формують у навантаженні напругу, форма і фаза якої не залежать від характеру навантаження. АІН живляться від джерел напруги. Якщо АІН живиться від випрямляча, то на вході інвертора ставлять конденсатор досить великої ємності для забезпечення провідності джерела постійної напруги у зворотному напрямку. Автономний інвертор напруги може працювати в режимі холостого ходу. Робота АІН у режимі, близькому до короткого замикання, визначається комутаційними властивостями повністю керованих вентилів чи прийнятим способом комутації та параметрами комутації елементів звичайних тиристорів. АІН мають малі зміни форми кривої й величини вихідної напруги при зміні вихідної частоти в широких межах. Комутаційні процеси в АІН мало впливають на форму кривої вихідної напруги, а встановлена потужність комутуючих елементів порівняно невелика. Зовнішня характеристика інвертора жорстка. Розглянемо роботу АІН на прикладі однофазного мостового інвертора напруги з активно-індуктивним навантаженням, схема якого приведена на рисунку 5.3.

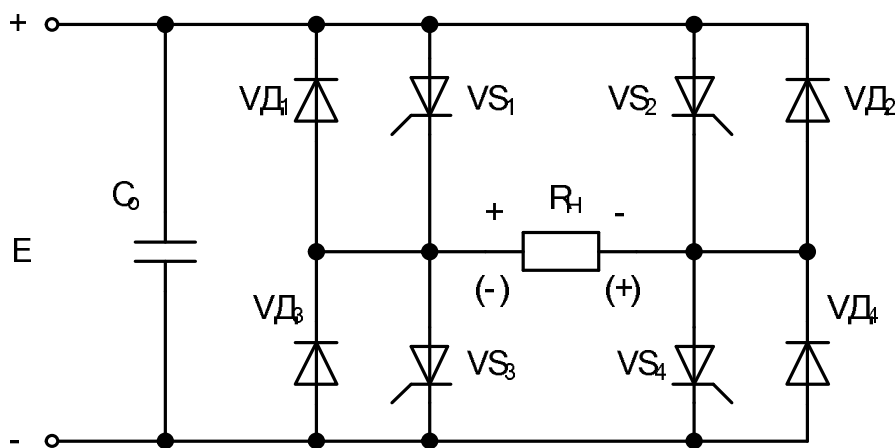


Рисунок 5.3 – Схема однофазного мостового автономного інвертора напруги

Часові діаграми, що характеризують роботу однофазного мостового автономного інвертора напруги, приведені на рисунку 5.4.

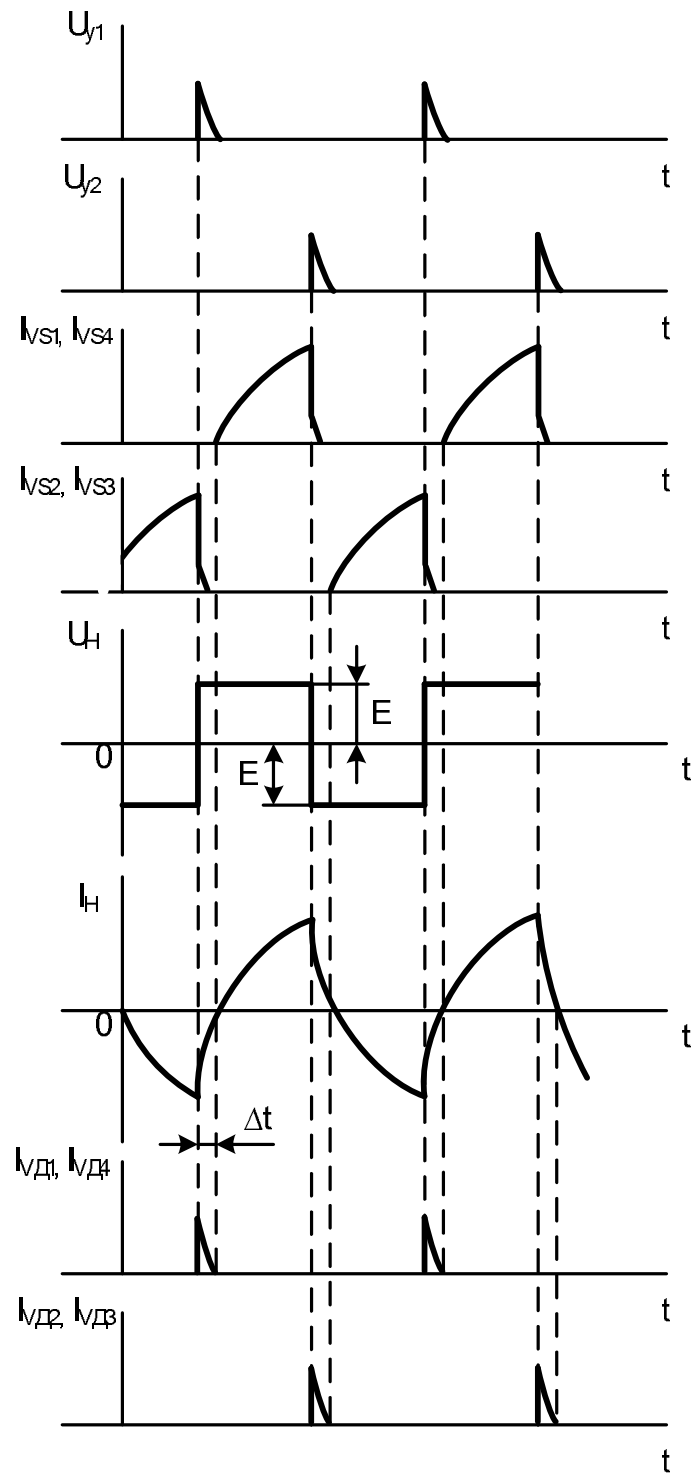


Рисунок 5.4 – Часові діаграми, що характеризують роботу однофазного мостового автономного інвертора напруги

Працює однофазний мостовий автономний інвертор напруги наступним чином. При включенні тиристорів VS_1 і VS_4 струм протікає від позитивного потенціалу джерела живлення E через тиристор VS_1 , навантаження, тиристор VS_4 і до від'ємного потенціалу джерела живлення E .

При цьому, на навантаженні з'явиться напруга, яка дорівнює E , позитивної полярності. При включенні іншої пари тиристорів VS_2 і VS_3 , тиристори VS_1 і VS_4 запираються, але струм у навантаженні не може змінити свій напрямок і протікає через зворотні діоди VD_3 і VD_2 , поки не зменшиться до нуля. В цей час енергія з навантаження передається до джерела живлення. Після цього струм у навантаженні буде протікати в зворотному напрямку через тиристори VS_2 і VS_3 . Після включення тиристорів VS_1 і VS_4 та закриття тиристорів VS_2 і VS_3 струм у навантаженні не змінить свого напрямку й буде протікати через зворотні діоди VD_1 і VD_4 , поки не зменшиться до нуля, а енергія з навантаження передаватиметься до джерела живлення.

Таким чином, при використанні автономних інверторів напруги на навантаженні отримуємо різнополярну напругу прямокутної форми та форму струму, близьку до синусоїдальної. При використанні ШІМ форма струму в навантаженні може бути синусоїдальною.

Найбільше застосування знайшли трифазні АІН з широтно-імпульсною модуляцією. Автономні інвертори з ШІМ є найбільш перспективним перетворювачем енергії для асинхронного електроприводу. В автономних інверторах напруги частота перемикання ключів набагато більша за частоту вихідної напруги. Завдяки цьому виникає можливість шляхом плавної зміни шпаруватості протягом періоду вихідної напруги не тільки регулювати рівень цієї напруги, а й забезпечити практично синусоїдальну форму вихідного струму.

На рисунку 5.5 наведена схема трифазного мостового автономного інвертора напруги.

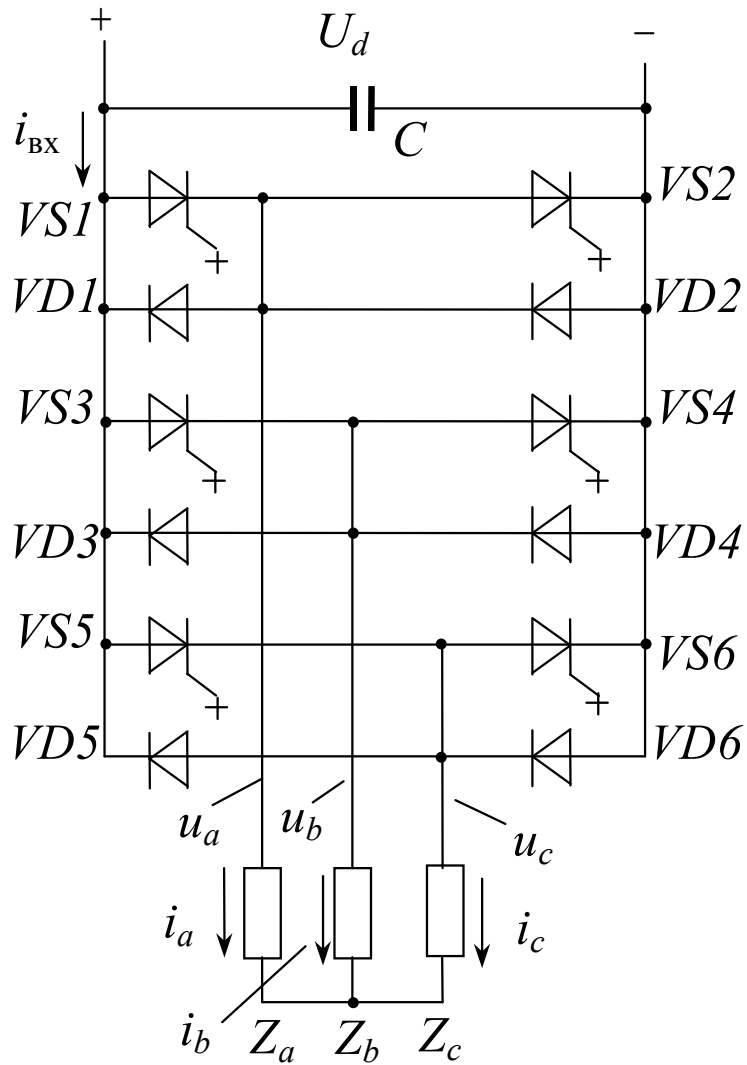


Рисунок 5.5 – Схема трифазного мостового автономного інвертора напруги

Часові діаграми роботи трифазного АІН з ШІМ та активно-індуктивним навантаженням наведені на рисунку 5.6.

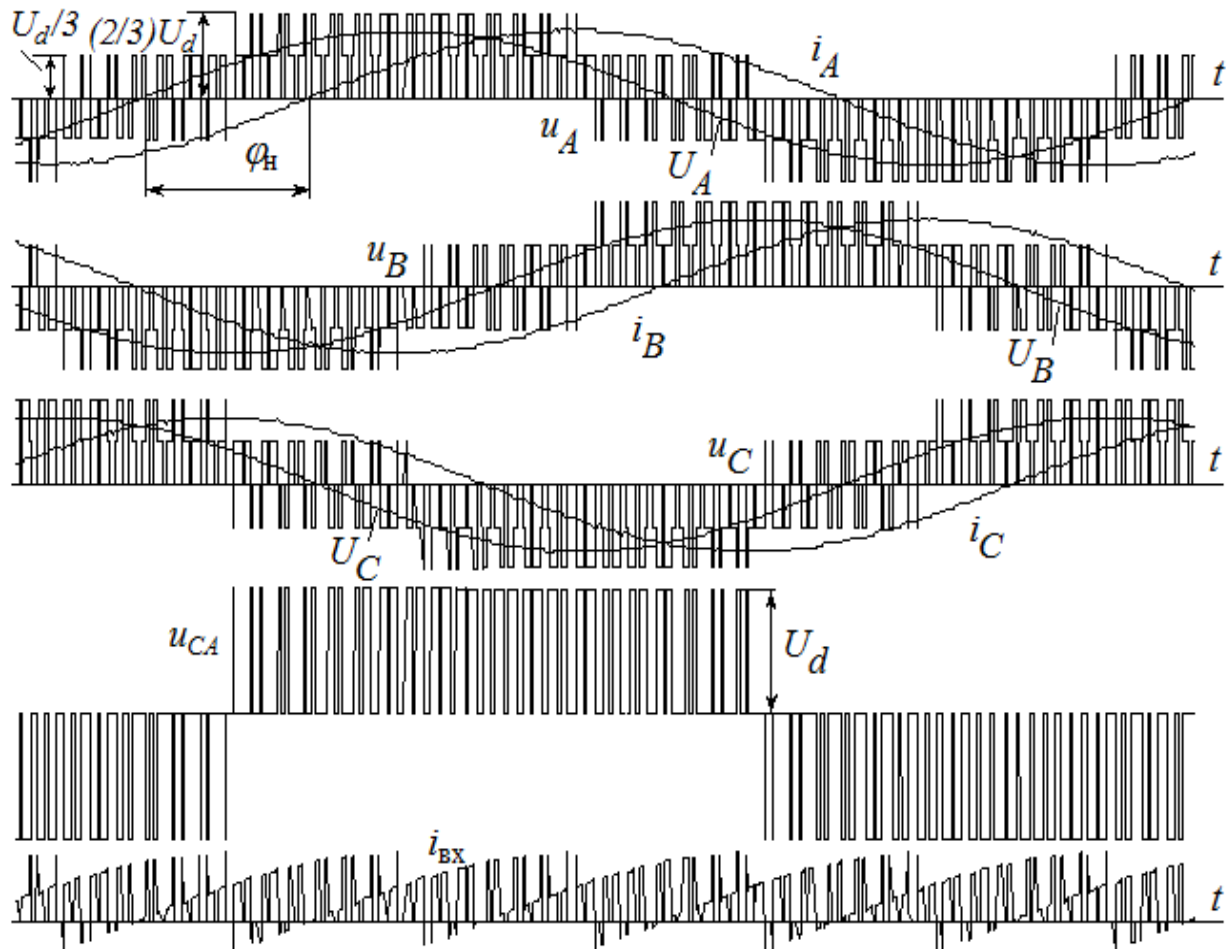


Рисунок 5.6 – Часові діаграми трифазного АІН з ШІМ
і активно-індуктивним навантаженням

Контрольні запитання

1. Від яких джерел живляться АІН?
2. Який фільтр ставлять на вході АІН?
3. Чи може працювати АІН у режимі холостого ходу?
4. Чи може працювати АІН у режимі, близькому до короткого замикання?
5. Як впливають комутаційні процеси в АІН на форму кривої вихідної напруги?
6. Де використовують трифазні АІН з широтно-імпульсною модуляцією?

7. Поясніть принцип ШІМ.
8. Поясніть роботу автономного інвертора напруги в режимі ШІМ.
9. Як визначити частоту вихідного струму автономного інвертора напруги?
10. Як змінюються імпульси ШІМ автономного інвертора напруги при розгоні електродвигуна?
11. Як змінюються імпульси ШІМ автономного інвертора напруги при сповільненні електродвигуна?
12. Як визначити період вихідного струму АІН?

5.3 Розрахунок параметрів схеми автономного інвертора

Трифазний автономний інвертор напруги може бути виконаний на запираючих тиристорах (ЗТ), наприклад, зі струмом 1000 А і напругою 1200 В. В процесі роботи АІН до ЗТ прикладається пряма напруга $U_{d_{\max}}$ і комутаційне перенапруження, обмежуване демпфуючим ланцюгом. Для можливості роботи ЗТ у схемі АІН параметри демпфуючого ланцюга мають обмежувати перенапруження на рівні до 1000 В. В режимі широтно-імпульсної модуляції ЗТ має комутувати максимальне значення струму навантаження $I_{\text{вих}}$ з урахуванням коефіцієнта перевантаження по струму $K_i = 1,5$.

З урахуванням несинусоїдальності форми струму навантаження:

$$I_{\text{вих, макс}} = I_{\text{вих}} \cdot K_i . \quad (5.1)$$

Середній струм ЗТ визначається за виразом:

$$I_{\text{тср}} = I_{\text{вих}} \frac{1 + \cos \varphi_{\max}}{\sqrt{2\pi}} . \quad (5.2)$$

Діючий струм ЗТ:

$$I_{\text{ТД}} = I_{\text{ВІХ}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi}(\pi - \varphi + \sin\varphi\cos\varphi)} \approx \frac{I_{\text{ВІХ}}}{\sqrt{2}}. \quad (5.3)$$

Середній струм діода зворотного струму визначається за виразом:

$$I_{\text{дср}} = I_{\text{ВІХ}} \frac{1 - \cos\varphi_{\text{мин}}}{\sqrt{2}\pi}. \quad (5.4)$$

Необхідно вибрати швидковідновлюючий діод 12 класу на розрахований струм.

Розрахунок струмообмежуючої індуктивності проводиться за умов обмеження di/dt :

$$L = \frac{U_{\text{д макс}}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{доп}}}. \quad (5.5)$$

Допустиме значення di/dt для ЗТ складає 200 А/мкс.

Місткість конденсатора демпфуючого ланцюга вибирається за умови обмеження dU/dt на рівні 500 В/мкс при комутації максимального струму навантаження $I_{\text{ТМ}}$:

$$C_s = \frac{I_{\text{ТТ}}}{\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{макс}}}. \quad (5.6)$$

Індуктивність демпфуючого ланцюга не повинна перевищувати:

$$L_s = \frac{U_{\text{д макс}}}{2\left(\frac{dI_{\text{Т}}}{dt}\right)_{\text{макс}}}, \quad (5.7)$$

де $(dI_{\text{Т}}/dt)_{\text{макс}}$ – швидкість спаду струму ЗТ при виключенні.

Приймаємо $(dI_{\text{Т}}/dt)_{\text{макс}} = 1000 \text{ А}$;

$U_{\text{д макс}}/2$ – граничне значення першого піку напруги на ЗТ.

Резистор демпфуючого ланцюга вибирається за умови:

$$\frac{U_{d \max}}{I_R} \leq R_s \leq \frac{1}{5C_s f_M}, \quad (5.8)$$

де $I_R = 0,1 I_{TM}$ – вибране значення розрядного струму;

f_M – максимальна частота комутацій ЗТ.

Потужність резистора:

$$P_R = \frac{1}{2} C_s U_{d \max}^2 \cdot f_M. \quad (5.9)$$

Діод VDS демпфуючого ланцюга працює в наступному режимі: $U_{обр} = 1000 \text{ В}$

$$I_{cp} = I_{TM} \cdot t_{\text{викл.}} \cdot f_M, \quad (5.10)$$

де $t_{\text{викл.}}$ – повний час виключення ЗТ;

$$t_{\text{викл.}} = 20 \text{ мкс}$$

$$I_{\text{діюч}} = I_{TM} \cdot \sqrt{t_{\text{викл.}} \cdot f_M}. \quad (5.11)$$

Необхідно використати швидковідновлюючий діод 12 класу на імпульсний струм, виходячи зі значення діючого струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електроніка і мікросхемотехніка : У 4-х т. / [В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько та ін.]. – Київ : Обереги, 2000. –Т.1.: Елементна база електронних пристроїв. – 300 с.
2. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи : Семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – М. : Издат. дом Додэка-XXI, 2001. – 384 с.
3. Шавьолкін О. О. Перетворювальна техніка : навч. посібник / О. О. Шавьолкін, О. М. Наливайко. – Краматорськ : Донбаська ДМА, 2008. – 328 с.
4. Попов О. З. Основы преобразовательной техники : учеб. пособие / О. З. Попов. – М. : Изд. дом МЭИ, 2007. – 200 с.
5. Bose Bimal K. Power Electronics and AC Drives. – Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.
6. Bose Bimal K. Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. – Elsevier, 2006. – 917 p.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до організації самостійної роботи
та проведення практичних занять
із навчальної дисципліни

**СИЛОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

Укладачі: **ШПІКА** Микола Іванович,
ЗАКУРДАЙ Світлана Олександрівна,
ГЕРАСИМЕНКО Віталій Анатолійович

Відповідальний за випуск *М. І. Шпіка*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2019, поз. 165М

Підп. до друку 19.03.2019. Формат 60 × 84/16

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,2

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.